



GRADO EN ADMINISTRACIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

CURSO ACADÉMICO 2020/2021

TRABAJO FIN DE GRADO

**BLOCKCHAIN APLICADO A EMPRESAS DE
RECICLAJE Y VALORIZACIÓN DE LA ECONOMÍA
CIRCULAR**

**BLOCKCHAIN APPLIED TO RECYCLING AND
RECOVERY COMPANIES IN THE CIRCULAR
ECONOMY**

AUTOR

VITALIE ROTARI

DIRECTOR

PABLO MARÍA DE CASTRO GARCÍA

SANTANDER

JULIO 2021

RESUMEN

La mayoría de los problemas medioambientales a los que tenemos que hacer frente en las próximas décadas se deben en gran medida al actual modelo económico lineal que se basa en producir, usar y tirar. Este sistema ha generado grandes avances para la humanidad, pero también ha provocado una serie de consecuencias negativas como el cambio climático, el agotamiento de recursos escasos, la pérdida de biodiversidad, así como la contaminación del aire, la tierra y océanos. Para revertir esta situación es menester tomar medidas drásticas que estén en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y los objetivos del Acuerdo de París para alcanzar la neutralidad climática en 2050. La economía circular se postula como la solución ideal para superar las desventajas de las actividades económicas del statu quo y la consecución de los objetivos mencionados anteriormente, pero este concepto también acarrea una serie de desafíos que impiden su adopción. Blockchain es una de las tecnologías disruptivas clave que se ha propuesto en diversos estudios para superar las barreras que impiden la implementación de la economía circular.

El propósito del presente Trabajo Fin de Grado consiste en ofrecer una visión general de dos conceptos relativamente recientes como son la Blockchain y la economía circular; y analizar las ventajas que aporta el primero en el sector del reciclaje. Tras realizar la introducción al trabajo se pasa a analizar el origen de Blockchain, sus características principales, su funcionamiento y los desafíos que presenta actualmente. Posteriormente, se continúa con la introducción al concepto de economía circular y las barreras que frenan su adopción a gran escala. Finalmente, se estudian las aportaciones que ofrece Blockchain dentro de la economía circular y, concretamente, en el sector de la gestión de residuos.

Palabras clave: Blockchain; economía circular; gestión de residuos; reciclaje

ABSTRACT

Most of the environmental problems we face in the coming decades are largely due to the current linear economic model based on produce, use and dispose. This system has generated great advances for humanity, but it has also caused a series of negative consequences such as climate change, the depletion of scarce resources, the loss of biodiversity, as well as the pollution of air, land and oceans. Reversing this situation requires drastic measures that need to be in line with the Sustainable Development Goals and the Paris Agreement targets to achieve climate neutrality by 2050. The circular economy is postulated as the ideal solution to overcome the disadvantages of status quo economic activities and the achievement of the aforementioned goals, but this concept also brings with it a number of challenges that impede its adoption. Blockchain is one of the key disruptive technologies that has been proposed in various studies to overcome the barriers that prevent the implementation of the circular economy.

The purpose of this Final Degree Project is to provide an overview of two relatively recent concepts such as Blockchain and the circular economy; and to analyze the advantages of the former in the recycling sector. After the introduction to this project, we will analyze the origin of Blockchain, its main characteristics, its operation and the challenges it currently presents. Subsequently, it continues with the introduction to the concept of circular economy and the barriers that hinder its adoption on a large scale. Finally, the contributions offered by Blockchain within the circular economy and, specifically, in the waste management sector are studied.

Keywords: Blockchain; cricular economy; waste management; recycling

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1. INTRODUCCIÓN.....	7
2. BLOCKCHAIN.....	8
2.1. DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGY	8
2.2. ANTECEDENTES	9
2.3. BLOCKCHAIN vs. BASE DE DATOS TRADICIONAL.....	10
2.4. FORTALEZAS DE LA BLOCKCHAIN	11
2.5. FUNCIONAMIENTO DE LA BLOCKCHAIN	12
2.5.1. Algoritmos de consenso	14
2.6. TIPOS DE REDES BLOCKCHAIN	15
2.7. DESAFÍOS DE LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN.....	17
3. TRANSICIÓN HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR.....	18
3.1. ¿QUÉ ES LA ECONOMÍA CIRCULAR?	19
3.2. ¿QUÉ OFRECE LA ECONOMÍA CIRCULAR?	20
3.3. BARRERAS QUE FRENAN LA TRANSICIÓN	21
3.4. EL PAPEL DE BLOCKCHAIN EN LA ECONOMÍA CIRCULAR.....	22
4. APLICACIONES EN EL SECTOR DEL RECICLAJE	23
4.1. SITUACIÓN ACTUAL EN EL SECTOR DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS ..	24
4.2. EL VALOR DE BLOCKCHAIN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS	24
5. CONCLUSIONES.....	27
6. BIBLIOGRAFÍA.....	28

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Funcionamiento de la Blockchain	13
Figura 2: Cadena de bloques genérica.....	14
Figura 3: Tipos de redes Blockchain	16
Figura 4: Diagrama del sistema de la economía circular	20

1. INTRODUCCIÓN

El 2020 pretendía ser un año decisivo para la acción climática. Países de todo el mundo iban a poner en marcha nuevos planes de reducción de emisiones más ambiciosos en relación con el Acuerdo de París. Se suponía que iba a ser un gran año, con eventos, como la celebración de la vigésima sexta Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP26, por sus siglas en inglés), y decisiones importantes sobre el clima, la biodiversidad y el océano. Pero al final el protagonismo se lo ha llevado el COVID-19. La crisis sanitaria provocada por la pandemia obligó a los gobiernos nacionales a relegar a un segundo plano la acción contra el cambio climático, para enfocarse en controlar la propagación del coronavirus y ayudar a los afectados. Está claro que actualmente la mayor amenaza para la salud pública mundial es el COVID-19, pero no hay que olvidar que durante las próximas décadas la humanidad tiene que lidiar con otro gran problema que amenaza nuestra existencia: el cambio climático. Por el momento la emergencia climática no genera en la sociedad el mismo desasosiego que el COVID-19, pero si los líderes políticos no empiezan a tomar medidas drásticas para revertir el impacto del cambio climático, la situación a finales de este siglo será mucho más trágica que la actual (Dagnet, et al., 2020).

A lo largo de los años, científicos de todo el mundo han desarrollado diferentes métodos para determinar qué factores son los causantes del calentamiento sin precedentes que estamos experimentando en la actualidad. Y, en gran parte de los registros, la huella humana aparece como el mayor contribuyente a este problema, observable en el océano, la atmósfera y en la superficie de la Tierra (Union of Concerned Scientists, 2018). Las ingentes cantidades de gases provenientes de la quema de combustibles fósiles junto a los que se liberan de forma natural en la atmósfera, la deforestación y la cría de ganado provocan un aumento del efecto invernadero y el calentamiento global. La concentración de dióxido de carbono, producida por la actividad humana, en el año 2020 había aumentado hasta un 48% por encima de su nivel preindustrial (antes de 1750). La acumulación de este gas en la atmósfera junto con otros gases de efecto invernadero como el metano y el óxido nitroso impiden que el calor de sol escape al espacio, provocando así el calentamiento global. La pasada década fue la más cálida jamás registrada, con una temperatura media mundial superior en 1,1°C a los niveles preindustriales. Un incremento de 2°C con respecto a los niveles de la era preindustrial provocaría cambios catastróficos en el medioambiente, poniendo en peligro nuestra salud y nuestro bienestar (Comisión Europea, 2021a).

Fue a finales del siglo pasado cuando la sociedad empezó a tomar conciencia sobre este asunto, y desde entonces han ido surgiendo diversas iniciativas para frenar el cambio climático, en concreto, tras la conferencia de Río 92. En la actualidad, el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, en inglés), creado conjuntamente por las Agencias de la ONU (i.e., la Organización Meteorológica Mundial y el Programa de las Naciones Unidas para el Medioambiente), es una de las fuentes de información más fiables sobre el cambio climático. Para concienciar a las personas y llevar a cabo unas prácticas más sostenibles con el medioambiente, la ONU, ha desarrollado en las últimas décadas varias campañas y agendas importantes, como la creación de los ODS y la Agenda 2030 (Dantas, 2018).

El Acuerdo de París es el primer tratado universal sobre el cambio climático, adoptado en la Conferencia sobre el Clima de París (COP21, por sus siglas en inglés) a finales del año 2015. Los Gobiernos acordaron objetivos a largo plazo para mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de los 2°C, en comparación con los niveles preindustriales. El papel de la Unión Europea fue fundamental para alcanzar dicho acuerdo (Comisión Europea, 2021b). En línea con los objetivos establecidos durante la Conferencia de las Naciones Unidas, la Comisión Europea

presentó en el año 2019 el Pacto Verde Europeo para aspirar a una Unión Europea climáticamente neutra a mitad de este siglo (Comisión Europea, 2019).

El primer cambio que debemos adoptar para conseguir este objetivo consiste en abandonar la cultura de usar y tirar, y pasar a una economía completamente circular. Con una economía enteramente lineal como la actual, donde solo el 12% de los materiales y recursos secundarios se vuelve a reinsertar de nuevo en la economía, no conseguiremos grandes avances en la carrera hacia un futuro ecológico. La Comisión Europea ha dado el primer paso presentando a principios del año pasado el nuevo Plan de Acción para la Economía Circular, el cual contiene medidas para renovar el primer eslabón de la cadena de la sostenibilidad: el diseño de los productos. Esto dará lugar a un mejor aprovechamiento de los recursos, manteniéndolos en la economía durante el mayor tiempo posible y garantizando que no se desperdicie nada; y a un empoderamiento de los consumidores, dándoles más opciones sostenibles que les beneficie a ellos y al medioambiente (Comisión Europea, 2020).

Una de las formas más efectivas para hacer frente a los problemas que plantea la crisis climática actual es mediante el uso de tecnologías disruptivas como Blockchain. Esta tecnología funciona como una red descentralizada compuesta por varios nodos independientes que se encargan de verificar los registros inmutables en tiempo real. Una de las funcionalidades estrella de la Blockchain son los contratos inteligentes (*smart contracts*, en inglés), mediante esta herramienta las empresas pueden calcular, rastrear e informar sobre la reducción de la huella de carbono en toda la cadena de suministro, mejorando significativamente la transparencia y la trazabilidad de las emisiones de gases de efecto invernadero. El enfoque descentralizado de la Blockchain permite reunir los esfuerzos individuales en un esfuerzo concertado en red, permitiendo la participación de todas las partes involucradas en una economía: empresas, gobiernos e individuos. Por todo esto, la economía circular junto con la Blockchain pueden convertirse en los aliados perfectos para evitar el colapso ecológico (Comisión Europea, 2021c).

2. BLOCKCHAIN

En este apartado se estudiará el origen de esta tecnología incipiente, su funcionamiento y las características principales que la componen.

Antes de comenzar a explicar el funcionamiento de Blockchain es necesario aclarar que esta es una de las muchas tecnologías de registro distribuido (DLT, en inglés). Es frecuente que se usen estos dos términos indistintamente, y por eso es importante diferenciarlos bien para evitar malinterpretaciones.

2.1. DISTRIBUTED LEDGER TECHNOLOGY

La DLT es la base sobre la cual se fundamenta Blockchain y otras tecnologías que veremos más adelante. En primer lugar, hay que explicar que una DLT es, básicamente, un sistema digital que registra y sincroniza transacciones entre múltiples ordenadores independientes, más conocidos como nodos, situados en diferentes zonas geográficas. Difiere de una base de datos tradicional en que no depende de una entidad central para almacenar los registros. El sistema depende de una red de nodos para procesar y verificar cada transacción antes de que se añada al libro mayor principal. La notoriedad de Blockchain se debe en gran parte a su uso generalizado en el mundo de las criptomonedas como Bitcoin. La inmutabilidad de los registros, la naturaleza

incorruptible —que hace que no dependa de intermediarios—, y su resistencia a la censura, son las características principales que han hecho que se convierta en la DLT ideal para Bitcoin y las demás criptomonedas. En los últimos años, se han incluido nuevas funcionalidades dentro del ecosistema de Blockchain como los *smart contracts* y las DAOs (*Decentralized Autonomous Organizations* u Organizaciones Autónomas Descentralizadas). Las DLT que han ido surgiendo a partir del nacimiento de Blockchain se centran en tener una adopción masiva, esto es, adaptarse a las necesidades de un mercado amplio, y seguir incrementando la descentralización (Rodríguez, 2020).

A continuación, vamos a explicar brevemente las más conocidas (Rodríguez, 2020):

DAG (*Directed Acyclic Graph*, en inglés): al igual que Blockchain es un libro mayor digital, pero no necesita nodos para verificar las transacciones. Ofrece una mayor escalabilidad, ya que a medida que se incrementa el tráfico de transacciones en la red funciona más rápido. Además, las comisiones por transacción son casi inexistentes debido a la ausencia de minado en la red. El defecto principal de DAG es su limitada capacidad para alcanzar un consenso descentralizado seguro.

Hashgraph: al igual que DAG no depende de mineros. Para proteger la red de posibles ataques emplea un mecanismo de consenso llamado aBFT (*asynchronous Byzantine Fault Tolerance*, en inglés). El protocolo de Hashgraph es considerado como un avance con respecto al de la Blockchain por su capacidad para realizar transacciones más rápidas de una forma más segura, justa y menos costosa. Este protocolo se ha implementado eficazmente en la red Hedera, ofreciendo la posibilidad de crear DApps de forma rápida y económica debido a las mínimas necesidades de banda ancha.

Holochain: es una *open source* que permite a los usuarios crear y alojar DApps de igual a igual directamente en la arquitectura del sistema. Este protocolo busca maximizar el poder de descentralización permitiendo una autonomía completa de los usuarios. Por otro lado, evita la dependencia de consenso en la red, facilitando así un desarrollo rápido y seguro de aplicaciones para una escalabilidad masiva.

Cereberus: es una de las DLTs más recientes y está diseñada para redes públicas descentralizadas a gran escala. Por lo tanto, tiene la capacidad de aceptar diferentes funcionalidades y aplicaciones desde cualquier parte del mundo. Esto lo logra a través de un mecanismo de consenso altamente escalable, que crea cadenas paralelas llamadas *shards* (o fragmentos), para dispersar la carga de trabajo de la red conforme aumenta la actividad. El protocolo de este sistema es capaz de alojar un número de nodos virtualmente ilimitado, que participan para lograr un consenso mediante cualquier potencia de procesador, almacenamiento y banda ancha. En el caso de Bitcoin, por ejemplo, para participar en la validación de transacciones es necesario disponer de un gran poder computacional.

2.2. ANTECEDENTES

A diferencia de la reciente crisis disruptiva causada por la expansión mundial de la pandemia del COVID-19, la Gran Recesión de 2008 no fue provocada por una crisis sanitaria, sino que fue consecuencia de una burbuja inmobiliaria y financiera, que estalló con el derrumbamiento del gigante bancario estadounidense *Lehman Brothers*. Esto se debió en gran parte por los altos niveles de endeudamiento poco sostenibles en el tiempo de empresas y hogares, y por una falta de calidad crediticia en muchos activos, que era desconocida por gran parte del público inversor, lo que provocó que la confianza en el sistema financiero se tambaleara a nivel mundial (Rodríguez Canfranc, 2020).

En este contexto, a finales del año 2008, Satoshi Nakamoto —seudónimo de la persona o grupo que creó Bitcoin— presentó una alternativa al modelo tradicional de realizar transacciones de forma online. En el artículo *“Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System”*, además de presentar el nuevo sistema de pagos, describe la tecnología sobre la cual construiría el protocolo de Bitcoin: Blockchain. El sistema de pagos creado por Nakamoto ofrece una solución al problema del doble gasto, prescindiendo de este modo de las instituciones financieras como terceros de confianza en el proceso de las transacciones electrónicas. El problema del doble gasto lo soluciona a través del uso de una red *peer-to-peer*, que sella las transacciones con una marca de tiempo en una cadena de bloques mediante un mecanismo de consenso llamado *proof-of-work* (Nakamoto, 2008).

Se suele atribuir la invención de la Blockchain a Nakamoto, pero los verdaderos progenitores de esta tecnología son Stuart Haber y W. Scott Stornetta. En el artículo *“How to time-stamp a digital document”*, que publicaron en 1991, describen la versión de Blockchain que se implementaría más tarde en la gran mayoría de las criptomonedas que conocemos actualmente. En 1995 decidieron poner en práctica su propio servicio de sellado de tiempo llamado Surety, cuyo producto principal es AbsoluteProof, el cual actúa como un sello criptográficamente seguro que verifica la autenticidad de documentos digitales. Los usuarios utilizan este software para crear un hash de cualquier documento digital, que luego es enviado a los servidores de Surety para ser sellado con una marca de tiempo. Una copia de cada sello de los clientes se envía a una base de datos universal de AbsoluteProof. De este modo, se crea un registro inmutable de todos los sellos, por lo que es imposible que un actor malicioso logre manipularlos. Para solucionar el problema de la confianza, en vez de publicar los hashes en un registro digital público como es el caso de Bitcoin, Surety crea un único valor hash de todos los nuevos sellos añadidos a la base de datos cada semana y lo publica en un pequeño anuncio del New York Times. Este procedimiento se realiza desde 1995, lo cual la convierte en la cadena de bloques más antigua del mundo (Oberhaus, 2018).

2.3. BLOCKCHAIN vs. BASE DE DATOS TRADICIONAL

En el fondo la Blockchain no es más que una base de datos gestionada por una red de usuarios y asegurada mediante criptografía, que difiere de una base de datos típica en la forma de almacenar los datos. La información se agrupa por bloques con una cierta capacidad de almacenaje, y una vez que se llenan se enlazan a otro bloque previo, formando así la cadena de bloques. Cada vez que un nuevo bloque es añadido a la cadena, se sella con una marca de tiempo, y se actualiza la Blockchain. Mientras que la base de datos de una entidad centralizada es gestionada por varios ordenadores localizados en un mismo edificio, la Blockchain es mantenida por miles de nodos en ubicaciones geográficas distintas. Cada nodo que forma parte de la red posee una copia del historial de los datos almacenados en la cadena desde su nacimiento, de modo que si un nodo tiene un error en su registro puede acudir a las copias de los miles de nodos restantes para corregirlo. En el supuesto de que un nodo decidiera manipular su copia del registro de datos para actuar de forma maliciosa, los demás usuarios compararían sus copias actualizadas y señalarían fácilmente al impostor. Además, es muy difícil alterar un bloque una vez que se añade a la cadena, porque cada uno de ellos posee un código hash propio, junto con el hash del bloque anterior y una marca de tiempo (véase Figura 2). El hash es creado por una función matemática que convierte una información digital en una serie de números y letras con una longitud determinada, si esa información es manipulada el hash cambia. Para que un actor malicioso tuviera éxito tendría que controlar a la vez más de la mitad de las copias de la Blockchain, pero tal ataque, más conocido como *“51% attack”*, además de ser costoso sería inútil, porque

las alteraciones serían perceptibles por los demás miembros de la red que actualizarían la Blockchain a una nueva versión a través de una bifurcación. En el caso de Bitcoin, por ejemplo, la versión antigua caería en picado y el atacante tendría el control sobre un activo sin valor. Se diseñó de este modo para que la participación en la red fuera mejor incentivada económicamente que el ataque (Conway, 2020).

2.4. FORTALEZAS DE LA BLOCKCHAIN

El ecosistema de Blockchain se está diversificando cada vez más rápido y están apareciendo numerosas iniciativas en distintos ámbitos. Más allá de su uso en el sector financiero (e.g., criptomonedas, bancos, seguros, etc.), otros sectores como la manufactura, la logística, la atención médica o los servicios públicos también están experimentando con la cadena de bloques (Copigneaux, et al., 2020). A continuación, comentaré algunas de las características principales de la Blockchain que la hacen tan atractiva frente a las bases de datos centralizadas.

Descentralización

La descentralización es una característica esencial, ya que permite a los participantes de la Blockchain interactuar directamente a través de una red *peer-to-peer* sin la intermediación de ninguna organización o autoridad central. Cada participante de la red dispone de una copia del libro mayor, el cual se actualiza constantemente con nueva información que se registra de forma descentralizada. La actualización del libro mayor requiere un consenso entre las distintas partes de la red. En el caso de las redes públicas se emplean algoritmos de consenso que consumen una gran cantidad de energía, lo cual afecta negativamente al medioambiente. Por contra, en las redes privadas el consenso se logra gracias a un conjunto de reglas predefinidas por los participantes de la red para agregar y actualizar los registros del libro mayor (Kouhizadeh & Sarkis, 2018).

Seguridad

Gracias a su naturaleza descentralizada la Blockchain es menos vulnerable a posibles hackeos informáticos o fallas en el sistema. Un problema de seguridad común en las bases de datos centralizadas que consigue eliminar la tecnología Blockchain es el punto de fallo único. El uso de técnicas criptográficas como funciones hash y marcas de tiempo mejora la confianza y la seguridad del sistema, lo cual facilita la interacción entre las distintas partes, y además protege el libro mayor de posibles manipulaciones o falsificaciones. La marca de tiempo juega un papel importante en la trazabilidad y transparencia de la información (Kouhizadeh & Sarkis, 2018).

Transparencia

Los participantes de la Blockchain disponen en todo momento de la misma copia del libro mayor, que contiene la lista de transacciones. El historial completo de registros está visible para todos los participantes de la red, lo cual permite una mayor auditabilidad y trazabilidad. Esta característica hace que la Blockchain sea ideal para el caso de las cadenas de suministro, donde los consumidores exigen cada vez más transparencia. En combinación con otras tecnologías de rastreo como la identificación por radiofrecuencia (RFID), el Internet de las cosas y los dispositivos inteligentes es posible vincular productos físicos con los registros de la Blockchain, de este modo las partes interesadas de la cadena de suministro pueden rastrear el origen y el flujo de productos y procesos desde la extracción de la materia prima hasta el cliente final. Además, dado que los registros están asegurados con una marca de tiempo, el fraude y la manipulación de datos son fácilmente detectables y rastreables (Kouhizadeh & Sarkis, 2018).

Inmutabilidad

Los datos y la información son inmutables, es decir, los registros no se pueden cambiar o modificar sin el consenso de los miembros de la red. Esta característica se debe a que la Blockchain sigue una metodología *append-only* (i.e., los registros solo se pueden añadir al libro mayor y no se pueden eliminar) (Kouhizadeh & Sarkis, 2018).

Automatización

Las transacciones se pueden incluso automatizar gracias a los *smart contracts*. Los contratos inteligentes son códigos informáticos (o *scripts*, en inglés) que contienen ciertas condiciones y términos de contratos. Estos códigos pueden ejecutar automáticamente los términos de los acuerdos con el objetivo de eliminar la intervención humana en los contratos. El papel de ciertos intermediarios como los profesionales financieros y jurídicos en los contratos tradicionales se puede minimizar, lo cual incrementa la eficiencia y reduce los costes de las transacciones comerciales (Kouhizadeh & Sarkis, 2018).

2.5. FUNCIONAMIENTO DE LA BLOCKCHAIN

Esta tecnología da la posibilidad, a aquellos actores que se encuentran geográficamente distantes o que no confían entre ellos, de intercambiar cualquier tipo de datos digitales en una red *peer-to-peer* sin terceras partes o intermediarios. Además de representar una moneda digital o *token* (e.g., Bitcoin, Ethereum, etc.), los datos, pueden representar contratos, títulos de propiedad, historiales médicos o cualquier otro tipo de transacción o activo que se pueda traducir de forma digital (Nascimento, et al., 2018).

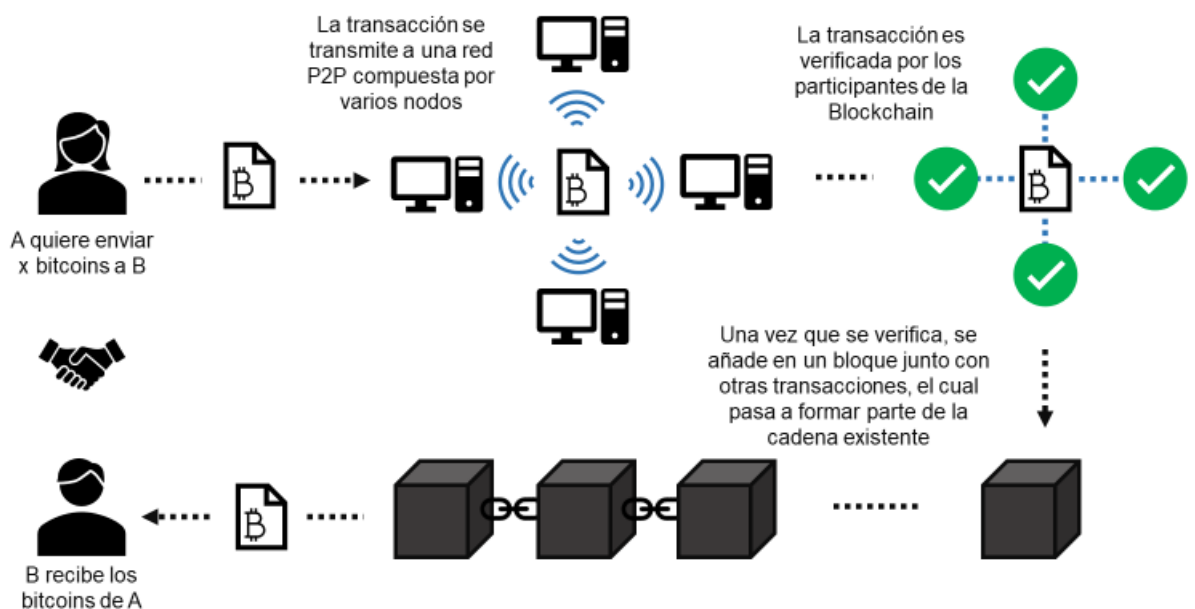
Los datos que componen una transacción pueden ser distintos según la Blockchain implementada, pero el mecanismo para realizar transacciones es el mismo. Al no existir intermediarios o un tercero de confianza que verifique la transacción, la Blockchain hace uso de la criptografía de clave asimétrica para comprobar la identidad de los usuarios y establecer una relación de confianza entre las partes. Este mecanismo asigna a cada usuario una clave pública (que cifra la transacción) y otra clave privada (que la descifra), relacionadas matemáticamente entre sí. Mientras que la clave pública designa una dirección con la cual los usuarios se identifican dentro de la red, la clave privada da acceso a los activos digitales y se emplea para firmar transacciones digitalmente. De este modo, se verifica la validez y autenticidad de las transacciones al mismo tiempo que permanecen visibles para los demás participantes de la red (Yaga, et al., 2018).

El proceso comienza cuando los usuarios de la red realizan cualquier interacción digital a través de la red *peer-to-peer* (en el caso de Bitcoin, por ejemplo, sería el intercambio de bitcoins). Imaginemos que el usuario A quiere enviar una cantidad de criptomonedas al usuario B. Para que la transacción se haga efectiva A transmite a la red la siguiente información: la dirección pública de B, la cantidad de criptomonedas que desea enviar, una firma digital y su clave pública. La clave privada de A, además de generar la firma necesaria para autorizar la transacción, es indispensable para que los demás nodos de la red puedan comprobar que A es el verdadero propietario de las criptomonedas (Binance Academy, 2020a).

Una vez que los nodos de la red verifican la autenticidad de la transacción, se añade en un bloque junto con otras transacciones. Un aspecto importante de la Blockchain consiste en determinar qué usuario se encarga de publicar el siguiente bloque. En la mayoría de las Blockchain esto se resuelve a través de un algoritmo de consenso. En las Blockchain públicas suele haber muchos nodos que compiten al mismo tiempo para publicar un bloque, con la finalidad principal de obtener criptomonedas o una comisión

por transacción (Yaga, et al., 2018). *Proof-of-Work* es uno de los algoritmos más conocidos actualmente porque es el que aplica Bitcoin para validar las transacciones y minar nuevos bitcoins. Los nodos responsables de agregar los bloques a la cadena son más conocidos como mineros. Antes de publicar el bloque los mineros deben resolver un problema matemático que requiere una energía computacional muy intensiva, este proceso se conoce como minería. El problema consiste en dar con un número aleatorio (más conocido como *nonce*, en inglés) que, combinado con los datos que se encuentran dentro del bloque, debe producir un resultado que coincida con las condiciones dadas una vez que se pasa por una función hash (siendo SHA-256 una de las más implementadas). Una vez que un minero encuentra la solución, la envía al resto de los nodos para que estos verifiquen la validez del resultado y, si esta es válida, el bloque pasa a formar parte de la Blockchain, el usuario B recibe las criptomonedas de A y el minero recibe una recompensa (Binance Academy, 2020b).

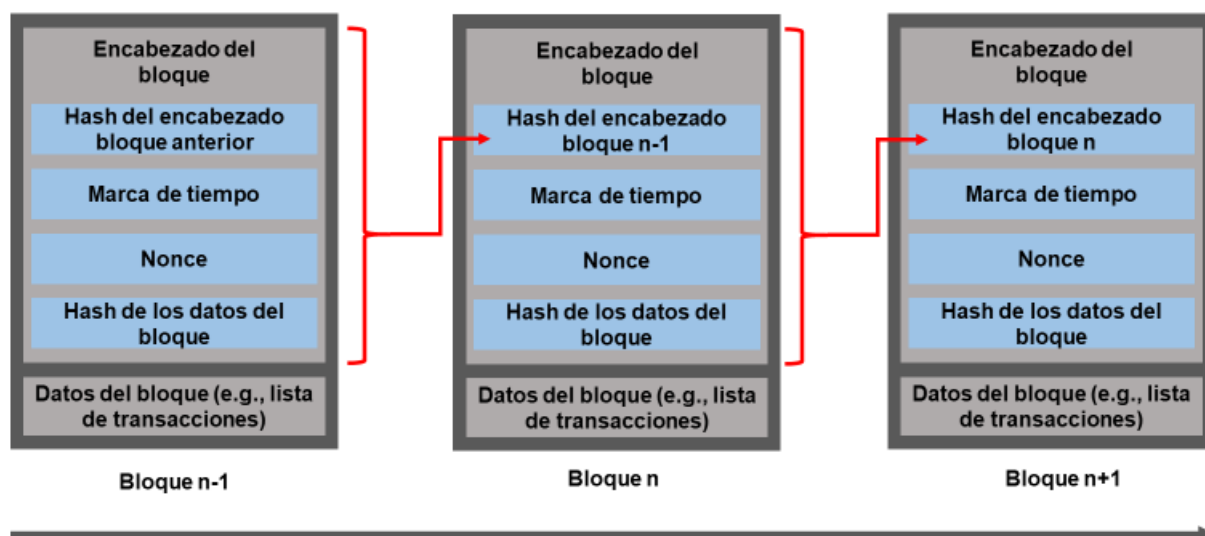
Figura 1: Funcionamiento de la Blockchain



Fuente: Adaptado a partir de (Herweijer, et al., 2018).

Un componente clave de la tecnología Blockchain es la función hash criptográfica para asegurar ciertas operaciones. Esta permite transformar un conjunto de datos de cualquier tamaño (e.g., una imagen, texto o archivo) en una secuencia de caracteres con una longitud determinada (hash). El algoritmo más implementado en la mayoría de las Blockchain es SHA-256 (*Secure Hash Algorithm*, en inglés). El hash que se obtiene con este algoritmo está compuesto por 64 caracteres hexadecimales con un tamaño de 256 bits o 32 bytes. Estas funciones hash se emplean para asegurar la información que está contenida en los bloques de la Blockchain (véase Figura 2). El nodo que se encarga de publicar el bloque crea un hash de los datos que hay dentro de este y luego lo almacena en el encabezado del mismo bloque, del cual se deriva el segundo hash que es almacenado en el encabezado del siguiente bloque (Yaga, et al., 2018).

Figura 2: Cadena de bloques genérica



Fuente: Adaptado a partir de (Yaga, et al., 2018).

2.5.1. Algoritmos de consenso

El algoritmo de consenso es el mecanismo que utilizan los nodos de una red Blockchain para llegar a un acuerdo sobre el estado actual del libro mayor de transacciones. Al no haber una autoridad centralizada que garantice la integridad y veracidad de los datos, deben ser los propios miembros de la red los que cumplan con esta ardua tarea. La prueba de trabajo (*proof-of-work*, en inglés) fue el primer mecanismo que se utilizó como protocolo de consenso dentro de una Blockchain. Desde que se introdujo, a principios de los años 90, hasta su aplicación en el sistema de Bitcoin, se empleó principalmente para prevenir ataques *spam* o DoS (*Denial-of-Service*, en inglés). En el ecosistema de las Blockchain este mecanismo se aplica para verificar las transacciones y publicar nuevos bloques. Los encargados de realizar esta tarea son más conocidos como mineros y compiten entre ellos para resolver un problema matemático complejo mediante un proceso que consiste en ejecutar un algoritmo hash de forma intensiva hasta que se da con la solución (Lewis, 2019).

Este proceso requiere una gran cantidad de trabajo computacional para obtener la solución, pero una vez que se consigue es fácil verificar su validez. El uso de problemas que requieren una gran fuerza de cómputo para ser resueltos ayuda a combatir ataques *Sybil* (es un ataque de seguridad informática donde un actor malicioso crea múltiples identidades para ganar influencia y ejercer control sobre la red), pero, por otro lado, provoca que los mineros se organicen en *mining pools*, para obtener mejores rendimientos, poniendo en tela de juicio la descentralización de las redes Blockchain (Yaga, et al., 2018).

A continuación, vamos a comentar algunos de los principales algoritmos de consenso que se han ido desarrollando para sustituir la prueba de trabajo:

Proof of Stake (PoS): este modelo no requiere tantos recursos (tiempo, electricidad y potencia computacional) como en el caso de la prueba de trabajo, por lo que es más respetuoso con el medioambiente. Este algoritmo se basa en la idea de que cuanto más participación (*stake*, en inglés) tenga un usuario dentro de la red, más interés tendrá en que el sistema funcione de manera correcta, y es menos probable que actúe de forma deshonesto. La participación se representa a menudo con una cantidad de criptomonedas que el usuario de la Blockchain ha invertido en el sistema, y es el principal factor que permite a los nodos de la red publicar nuevos bloques. Además, se han ido desarrollando otros métodos con el objetivo de no beneficiar únicamente a los usuarios que tengan mayor participación: la selección aleatoria de usuarios, el sistema de votación en múltiples rondas, en función de la edad de la moneda y un sistema de delegación. Este último se conoce como la prueba de participación delegada y es la versión democrática del mecanismo PoS, ya que los usuarios votan a otros nodos para que estos publiquen los bloques en su lugar. El poder de voto de cada usuario está ligado a la participación que tengan en el sistema. Los delegados seleccionados para publicar los bloques también participan en el gobierno de la Blockchain proponiendo cambios y mejoras que se someten a votación (Yaga, et al., 2018).

Proof of Authority (PoA): en este caso los nodos deben demostrar su verdadera identidad mediante documentos que son verificados e incluidos en la Blockchain. A la hora de publicar los bloques, los validadores no demuestran su buena voluntad mediante la posesión de una gran cantidad de criptomonedas dentro de la red, sino que lo logran compartiendo su identidad real con los demás usuarios. Si un nodo se comporta de un modo que los demás usuarios de la red no están de acuerdo su reputación bajará, y tendrá menos probabilidades de ser elegido como validador. Este mecanismo solo se aplica en las Blockchain privadas con altos niveles de confianza (Yaga, et al., 2018).

Proof of Elapsed Time (PoET): al igual que en el caso anterior se utiliza principalmente en las Blockchain privadas para escoger a los validadores encargados de publicar los bloques. Este algoritmo funciona como un sistema de lotería justo, donde todos los nodos tienen la misma probabilidad de ser escogidos como validadores. Para ello a cada nodo de la red se le asigna un tiempo de espera al azar, y se ausenta durante ese periodo. El primero que despierte del estado de ausencia, es decir, el nodo con el menor tiempo de espera asignado será el encargado de añadir el siguiente bloque. El flujo de trabajo es similar al del mecanismo PoW, utilizado por Bitcoin, pero sin desperdiciar una gran cantidad de energía de cómputo. En este caso, el tiempo de espera que tienen que cumplir los nodos se aprovecha para realizar otras tareas, incrementando de este modo la eficiencia (Frankenfield, 2020).

Estos serían algunos de los más conocidos, pero existen muchos otros como la prueba de capacidad, de importancia, de actividad, de quemado, etc. La mayoría de las plataformas Blockchain utilizan la prueba de trabajo o las diferentes variaciones de la prueba de participación. La prueba de participación delegada es probablemente la más ideal, ya que, al disponer de un número limitado de validadores, los bloques se validan de forma más rápida consiguiendo una gran eficiencia energética (Grigorchuk, 2019).

2.6. TIPOS DE REDES BLOCKCHAIN

Debido a que la Blockchain es una tecnología naciente, la clasificación exacta y las definiciones de las diferentes estructuras de Blockchain siguen estando sujetas a debate. En general, se reconocen dos categorías principales: públicas y privadas. La distinción se hace en función del acceso, es decir, quién puede leer y enviar transacciones, y participar en el proceso de consenso (Hewett, et al., 2019).

Públicas: Las redes públicas son plataformas de registro descentralizadas. Suelen utilizar un software de código abierto y, por lo tanto, están abiertas a todo aquel que disponga de conexión a internet. Los participantes de la red tienen derecho a leer y escribir dentro del libro contable de la red, y a disponer de una copia de este sin el permiso de ninguna organización o entidad central. Para prevenir actos deshonestos por parte de algunos usuarios se emplean mecanismos de consenso, que obligan a estos a gastar o acumular recursos a la hora de publicar los bloques (i.e., *proof-of-work* y *proof-of-stake*) (Yaga, et al., 2018).

Privadas: Las redes privadas son mantenidas por aquellos usuarios que están autorizados por una entidad centralizada, la cual puede restringir de manera arbitraria quién puede ver y realizar registros o transacciones dentro de la red. Para participar en la red es requisito indispensable que los nodos demuestren su verdadera identidad, por tanto, los mecanismos de consenso que se emplean suelen ser más flexibles, rápidos y computacionalmente menos costosos que en el caso de las redes públicas (Yaga, et al., 2018).

Como podemos observar en la Figura 3, la clasificación se puede segmentar todavía más distinguiendo entre diferentes tipos de modelos de permisos (Hewett, et al., 2019).

Figura 3: Tipos de redes Blockchain

Tipos de redes Blockchain		Leer (quién puede acceder al <i>ledger</i> y ver transacciones)	Escribir (quién puede generar y enviar transacciones)	Confirmar (quién puede actualizar el libro mayor o <i>ledger</i>)
Abierta	Pública (sin permisos o <i>permissionless</i>)	Abierta a cualquiera	Cualquiera	Cualquiera
	Pública (con permisos o <i>permissioned</i>)	Abierta a cualquiera	Participantes autorizados	Todos o un conjunto de participantes autorizados
Cerrada	Consortio (varias organizaciones)	Restringido a un conjunto de participantes autorizados	Participantes autorizados	Todos o un conjunto de participantes autorizados
	Privada (con permisos o <i>permissioned</i>)	Totalmente privado o restringido a un conjunto limitado de nodos autorizados	Solo el operador de la red	Solo el operador de la red

Fuente: Adaptado a partir de (Hewett, et al., 2019).

Las redes de consorcio e híbridas son dos conceptos que pueden generar confusión, ya que se suelen utilizar de diferentes formas por distintas partes. Por eso es importante conocer las definiciones de cada una para evitar malinterpretaciones (Hewett, et al., 2019):

Híbrida: Esta solución combina las dos redes para aprovechar lo mejor de cada una. La red privada permite preservar cierta privacidad y controlar la visibilidad de la red, mientras que la red pública ofrece mejor transparencia e inmutabilidad de los datos. De

este modo pueden limitar el acceso a algunos datos a la vez que permite interactuar con otras redes públicas si es necesario.

Consorcio: En la Blockchain de consorcio el proceso de consenso es controlado por un número preseleccionado de participantes o nodos (e.g., un consorcio compuesto por 15 instituciones financieras donde cada una controla un nodo y de las cuales 10 deben verificar un bloque para que este pase a ser válido).

2.7. DESAFÍOS DE LA TECNOLOGÍA BLOCKCHAIN

A pesar de que la Blockchain está comenzando a tener gran aceptación por parte de muchas industrias, aún quedan varios desafíos que se deben solucionar antes de que la tecnología se despliegue a gran escala (Rijmenam, 2019):

Escalabilidad

El primer problema que presenta la Blockchain, al menos en las redes públicas, es el de la escalabilidad, esto es, la capacidad de manejar grandes cantidades de transacciones a altas velocidades. Por ejemplo, en la Blockchain pública de Bitcoin solo se puede introducir hasta 1 MB de datos en cada bloque, y es capaz de procesar alrededor de siete transacciones por segundo, mientras que la red de procesamiento de pagos electrónicos VISA y Alibaba son capaces de procesar cerca de 24.000 y 325.000 transacciones por segundo, respectivamente. Para las redes privadas como Hyperledger esto no es un problema tan grande, porque el número de nodos necesarios para validar cada bloque es menor, lo cual agiliza mucho más el proceso de validación de las transacciones. Existen otras tecnologías de registro distribuido (o DLT), como las que he comentado al principio de este capítulo, que ofrecen miles e incluso millones de transacciones por segundo, pero la implementación de estas aún es limitada (Rijmenam, 2019; Nascimento, et al., 2018; Lyons, et al., 2019).

Centralización

Aunque este problema no afecte a muchas tecnologías de registro distribuido, es necesario tenerlo en cuenta. El gran poder de Bitcoin se debe a su arquitectura descentralizada, la cual evita que ninguna parte centralizada controle la red. Sin embargo, se ha demostrado que tanto Bitcoin como Ethereum no son redes Blockchain verdaderamente descentralizadas, ya que los cuatro principales grupos mineros (*mining pools*) de Bitcoin y los tres principales grupos mineros de Ethereum controlan más del 50% de la tasa de hash. Esto puede poner en peligro la seguridad de las redes que dependen de la minería, porque están expuestas a posibles colusiones o ataques del 51% (*51% attack*) (Rijmenam, 2019; Nascimento, et al., 2018).

Consumo de energía

A pesar de que existe una gran variedad de mecanismos de consenso, en la actualidad la prueba de trabajo (*proof-of-work*) sigue siendo el más empleado. Este mecanismo se basa en resolver problemas matemáticos complejos, que utilizan vastas cantidades de energía. Se estima que el PoW de la Blockchain de Bitcoin consume actualmente 66,7 teravatios hora por año, lo cual es comparable al consumo anual de electricidad de un país como República Checa con cerca de 10,6 millones de habitantes. En los últimos años, se han desarrollado nuevos mecanismos de consenso que requieren menos energía, algunos de los más conocidos se han comentado brevemente en el apartado 2.5.1. (Rijmenam, 2019).

Seguridad

A día de hoy nadie ha sido capaz de comprometer la criptografía y la arquitectura descentralizada de las redes públicas, pero el desarrollo de la computación cuántica podría representar un gran peligro en el futuro. Además, las manipulaciones y colusiones son teóricamente posibles en estas redes a través de un ataque del 51% cuando la mayoría de los usuarios tienen el control del hash o la potencia informática. Por otro lado, las redes privadas también están expuestas a este problema, debido a que un menor número de participantes validadores incrementa la probabilidad de acuerdos paralelos para cambiar las reglas o revertir las transacciones. Por último, muchos participantes confían en empresas que ofrecen servicios de monedero digital para asegurar sus claves públicas y privadas, lo cual es otra vulnerabilidad de seguridad ya que estos intermediarios pueden representar un objetivo atractivo para hackeos informáticos (Nascimento, et al., 2018).

Privacidad

La transparencia e inmutabilidad de los datos en la Blockchain pueden generar problemas a la hora de publicar cierta información que es confidencial o cuando se necesita modificar posteriormente debido a errores en la entrada de datos. Las redes privadas pueden mitigar este problema mediante distintas capas de acceso a los datos que permiten acceder a la información solo a participantes específicos. Además, las redes públicas, como Bitcoin, no son completamente anónimas, sino que son pseudo anónimas, de modo que en algunos casos es posible vincular la identificación personal a direcciones de Bitcoin utilizadas para operar. Las investigaciones actuales se están centrando en resolver estos problemas de privacidad mediante el uso de protocolos criptográficos como *zero-knowledge proofs* (Nascimento, et al., 2018).

Mutabilidad

Otro punto a tener en cuenta es si Blockchain es realmente inmutable. Como hemos visto anteriormente las decisiones y relaciones entre los participantes se rigen por algoritmos de consenso, por lo que la inmutabilidad no se debe entender como inalterable sino más bien difícil de cambiar. De hecho, la alteración del registro de las transacciones o de la cadena de bloques ya ha sucedido antes a través del consenso. Uno de los casos más controvertidos tuvo lugar en el año 2016 cuando una DAO alojada en la red Ethereum sufrió un hackeo informático de alguien que descubrió un error en el código y robó más de 50 millones de dólares (Nascimento, et al., 2018).

3. TRANSICIÓN HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR

En una economía lineal como la actual los recursos que nos ofrece el planeta no son gestionados de una forma óptima, porque estos se extraen y se transforman en productos que cuando dejan de tener valor para el usuario se descartan en el medioambiente, contribuyendo de esta forma al calentamiento global y al deterioro ecológico. Para mantener el bienestar de las generaciones actuales y futuras es necesario cambiar por completo el statu quo, ya que la escasez de los recursos y el incremento de la población podrían acentuar los problemas ecológicos y desencadenar conflictos internacionales si esto no se aborda adecuadamente (Pheifer, 2017).

La idea de una economía circular ha ganado presencia en las políticas europeas desde 2011. Este nuevo sistema económico tiene el potencial de abordar muchos desafíos de la sociedad y las empresas de una manera coherente y práctica. Existen ejemplos de modelos de negocio exitosos, pero también hay que tener en cuenta una serie de

barreras y obstáculos que deben superarse antes de realizar la transición de una práctica lineal a una circular (Pheifer, 2017).

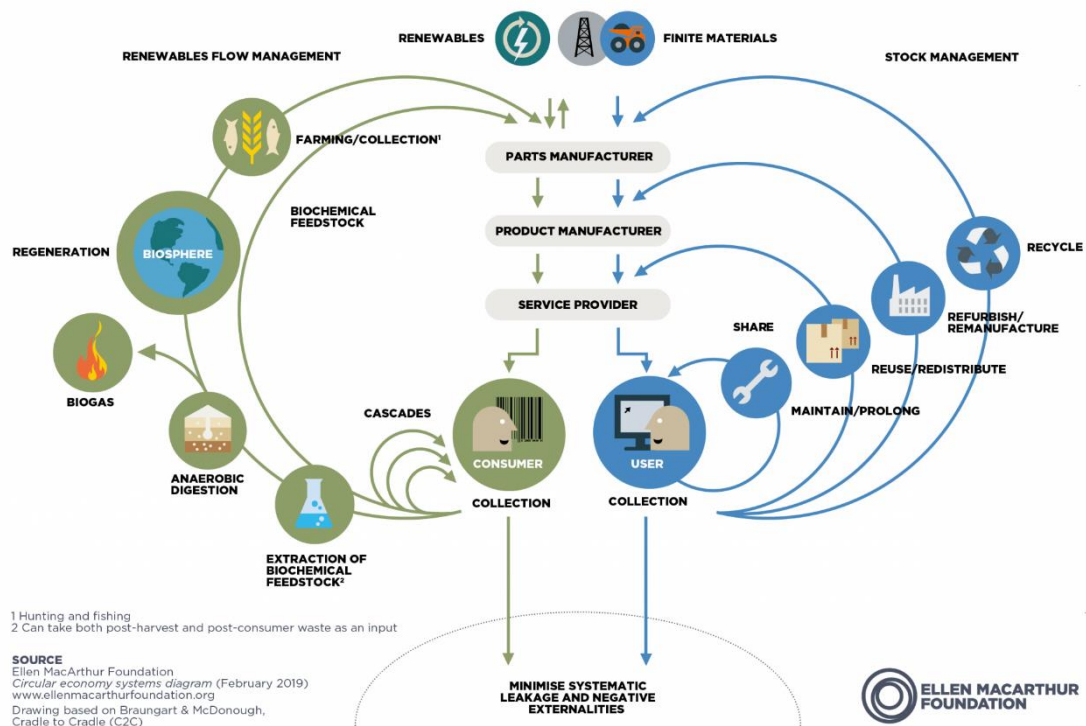
Por otro lado, para alcanzar la ansiada neutralidad climática no basta con descarbonizar solo el sector energético. Se requiere un cambio total de las industrias clave, desde el sector energético hasta el de la alimentación, lo cual se puede lograr a través de una mayor circularidad (Ishii, 2021). El 45% de las emisiones globales de gases de efecto invernadero proviene de la fabricación y el consumo de productos. Las estrategias de economía circular podrían reducir estas emisiones un 39%, mediante la reducción de la explotación de recursos vírgenes y un mejor aprovechamiento de los materiales que llegan al final de su vida útil (McGinty, 2021).

3.1. ¿QUÉ ES LA ECONOMÍA CIRCULAR?

Son varios los autores que han contribuido al desarrollo del concepto de economía circular, por lo tanto, su origen no se puede remontar a una fecha concreta. Pero sabemos que fue a finales de la década de 1970 cuando un número reducido de académicos y empresas empezaron a poner en práctica esta estrategia en los sistemas económicos y procesos industriales modernos (Ellen MacArthur Foundation, 2018).

La economía circular es un sistema económico de circuitos cerrados que se centra en reducir la extracción de materiales vírgenes y sacar el máximo provecho a aquellos productos y materiales que llegan al final de su vida útil, reintroduciéndolos de nuevo en la economía. A diferencia del modelo económico tradicional, que se centra principalmente en producir, usar y tirar, la economía circular sigue el enfoque de las 3 “R”: reducir, reusar y reciclar. Es decir, se reducen los residuos y la entrada de nuevos recursos; se maximiza el uso de los productos y materiales; y una vez que el producto cumple su ciclo de vida se recicla para cumplir las mismas o distintas funciones. Como podemos observar en la Figura 4 dentro de la economía circular se pueden distinguir dos ciclos: un ciclo biológico y otro técnico. Los materiales orgánicos como el algodón, la madera, los alimentos y el agua se pueden reutilizar de manera duradera y aprovechando al máximo sus propiedades a través de los procesos biológicos (i.e., dejando que el ecosistema se haga cargo del proceso lo máximo posible) o mediante lo que se conoce como cascadas, es decir, reutilizar el mismo producto para diferentes funciones. Dentro del ciclo técnico se gestionan los materiales finitos como los combustibles fósiles, plásticos y metales mediante estrategias como la reparación, reutilización, remanufactura o reciclaje. Por norma general, los ciclos cortos son preferibles frente a los largos porque no se requiere tanta energía para recuperar el valor original de los materiales (Het Groene Brein, 2020).

Figura 4: Diagrama del sistema de la economía circular



Fuente: (Ellen MacArthur Foundation, 2019).

3.2. ¿QUÉ OFRECE LA ECONOMÍA CIRCULAR?

Uno de los pilares clave del Pacto Verde Europeo —llevado a cabo por la Comisión Europea para conseguir que Europa se convierta en el primer continente climáticamente neutro de emisiones de carbono y totalmente circular en 2050— es el nuevo Plan de Acción para una Economía Circular, que se presentó en el mes de marzo del año 2020. Este nuevo plan de acción incluye medidas para un diseño de productos más sostenible, reducir residuos y dar más derechos a los consumidores (e.g., el derecho a reparar). La transición hacia este nuevo modelo, más sostenible, de producción y consumo reforzaría la competitividad de Europa y aportaría un 0,5% de incremento adicional del PIB y 700.000 empleos nuevos de cara a 2030. Una mejor gestión de los materiales y productos existentes dentro de la economía europea supondrá un menor impacto en el medioambiente, menos dependencia de otros países para obtener materiales vírgenes y una menor exposición a la volatilidad de los precios de las materias primas (Parlamento Europeo, 2021).

Una práctica muy común del sistema económico tradicional es la obsolescencia programada, que se basa en diseñar productos con una vida limitada para incitar al consumidor a que siga consumiendo. El sistema circular se centra en extender lo máximo posible el ciclo de vida de los productos y en mantener los materiales en la economía una vez que estos llegan al final de su vida, para seguir creando valor. Esta nueva práctica beneficia a los consumidores entregándoles unos productos más duraderos e innovadores que mejorarán su bienestar a la vez que ahorran dinero a largo plazo (Parlamento Europeo, 2021).

La transición hacia este nuevo paradigma dará como fruto, para las empresas, nuevas oportunidades de negocio, debido al incremento en la demanda de ciertos servicios, una relación más a largo plazo con los clientes, así como una reducción en los costes y un suministro más estable de los materiales. Dentro del sistema circular prima el uso frente al consumo, por lo tanto, esto dará paso a nuevos servicios de *leasing* y alquiler (e.g., *product-as-a-service*, *sharing economy*, etc.) donde existe una gran interacción con el cliente para mejorar algunos aspectos sobre el producto y el servicio, lo cual ofrece como resultado una mayor satisfacción para el cliente y una mayor lealtad a largo plazo (Het Groene Brein, 2020). Un ejemplo de modelo de negocio circular que podría acelerar la transición hacia el nuevo paradigma es el sistema *Product-as-a-Service* (PaaS, en inglés) (o producto como servicio). Este modelo ofrece una alternativa al modelo transaccional estándar, puesto que los clientes obtienen un servicio mediante contratos de arrendamiento o pago por uso en lugar de adquirir la propiedad del producto. Como la empresa sigue siendo la propietaria del producto está incentivada a mejorar constantemente y ofrecer un producto de calidad y duradero (Pheifer, 2017). Por otro lado, el uso de materiales reciclados frente al uso de materias primas primarias hará que las compañías incurran en unos menores costes de materiales y, de este modo, la incertidumbre sobre la disponibilidad de los materiales vírgenes no afectará la estabilidad de las empresas (Het Groene Brein, 2020).

3.3. BARRERAS QUE FRENAN LA TRANSICIÓN

Como hemos podido ver en el apartado anterior este nuevo modelo económico ofrece beneficios para la sociedad, la economía y el medioambiente. Pero a pesar de que la economía circular ha recibido el visto bueno por gran parte de las empresas y gobiernos, su implementación está teniendo un progreso muy lento. Según Kirchherr *et al.* (2018) las principales barreras que frenan la transición hacia el modelo circular en la Unión Europea se pueden agrupar en cuatro grupos: culturales, de mercado, regulatorias y tecnológicas.

La barrera cultural se debe a una desconfianza por parte de los consumidores, que prefieren productos nuevos frente a los productos reacondicionados o de segunda mano, y al poco compromiso que tienen las compañías a la hora de incluir este concepto en sus estrategias, misiones, visiones, objetivos y KPIs (*Key Performance Indicators*, en inglés). La preferencia de los consumidores por la moda rápida y el poco interés por los productos circulares podría perjudicar el modelo de negocio de una empresa que se centra en ofrecer productos duraderos, de modo que las compañías prefieren seguir operando mediante un modelo de negocio lineal. Por otro lado, aunque exista un apoyo por parte de las empresas hacia el cambio, la economía circular recibe poca atención en los departamentos con mayor peso dentro de las compañías (e.g., operaciones o finanzas), limitándose a los departamentos de responsabilidad social corporativa (RSC) y/o ambientales. Si la circularidad no tiene un lugar dentro de la estrategia de una compañía esto podría suponer una barrera importante para el progreso, ya que no se lleva a cabo ninguna traducción y desarrollo a los planes reales. Incluso aquellas empresas que adoptan un enfoque totalmente circular se topan con la poca voluntad que tienen las demás partes interesadas de su cadena de suministro de ser más circulares. La falta de transparencia y cooperación dentro de una cadena de suministro frustra la capacidad de cerrar los circuitos comerciales dentro de la economía circular (Kirchherr, et al., 2018; R2Pi Project, 2018; Pheifer, 2017).

Después de la barrera cultural los siguientes dos grupos que ejercen más resistencia al cambio son las barreras de mercado y las regulatorias, las primeras se deben en gran parte a los bajos precios de las materias primas vírgenes y al alto coste de la inversión inicial necesaria para la innovación empresarial, que desincentiva la adopción de un modelo circular. En algunos casos el bajo coste de los recursos vírgenes hace que sea inviable reciclar muchos materiales, ya que los productos circulares no pueden competir con aquellos que se elaboran con materias primas primarias. A diferencia de los modelos lineales, que cubren los costes con los ingresos obtenidos de las transacciones, los modelos circulares necesitan financiarlos por adelantado, ya que los ingresos pueden llegar a posponerse meses o incluso años. Por eso, muchas iniciativas circulares llevadas a cabo por empresas que aspiran a realizar la transición hacia una economía circular requieren unas fuentes de financiación sólidas para garantizar la viabilidad económica. La economía circular es un concepto que no es comprendido del todo actualmente por los acreedores financieros, de modo que los negocios circulares pueden verse como inversiones de alto riesgo debido a la falta de información. Estas barreras de mercado se deben en parte a las regulaciones y leyes inducidas involuntariamente por los gobiernos. En primer lugar, el bajo coste de los materiales vírgenes se debe a que la energía que se utiliza para la producción es subvencionada y, además, las externalidades negativas no se incluyen en el precio, de modo que aquellos productos que degradan el medioambiente suelen ser más baratos. Para cambiar el rumbo y favorecer el desarrollo de productos circulares, la Unión Europea, podría eliminar estos obstáculos redirigiendo los subsidios hacia las iniciativas circulares, incluyendo las externalidades negativas en el producto final y bajando el IVA en aquellos productos reciclados para hacerlos más atractivos (Kirchherr, et al., 2018; R2Pi Project, 2018; Pheifer, 2017).

Otro requisito importante para facilitar la transición hacia la economía circular consiste en disponer de la tecnología adecuada para recuperar y reciclar los productos de manera eficiente, sin embargo, este requisito no se ha cumplido del todo por el momento (Kirchherr, et al., 2018; R2Pi Project, 2018). Debido a la ausencia de unos sistemas adecuados de reciclaje para gestionar los residuos, casi una tercera parte de los plásticos no recolectados acaban en tierras, ríos y océanos de todo el mundo. Con la tecnología de reciclaje actual es complicado mantener la calidad y la pureza de los plásticos, de modo que, actualmente, solo el 2% se recicla en productos de la misma calidad y el resto se procesa en aplicaciones de menor valor. El desarrollo de tecnologías que permitan clasificar los materiales por composición química y eliminar los aditivos, motivará a los fabricantes a utilizar materiales reciclados para recuperar el valor económico de estos (Stanislaus, 2018).

A continuación, analizaremos cómo nos pueden ayudar las tecnologías de la Industria 4.0, en concreto la Blockchain, que ya están remodelando áreas como la atención médica, la movilidad y las finanzas, a cambiar la forma en la que administramos y valoramos nuestros recursos, para avanzar hacia sistemas más circulares y abordar los problemas medioambientales que hemos heredado de las revoluciones industriales pasadas (Waughray, et al., 2019).

3.4. EL PAPEL DE BLOCKCHAIN EN LA ECONOMÍA CIRCULAR

Para dejar atrás el sistema lineal y adoptar unas prácticas y comportamientos basados en la economía circular, como la producción y el consumo de recursos de forma

sostenible, la reutilización y reciclaje de productos, es necesario que exista una transparencia en la cadena de suministro para generar confianza en los productos que compramos (Lancelott, et al., 2020). Los consumidores, además de tener en consideración los precios y las marcas, exigen cada vez más información detallada sobre cuestiones éticas, de salud, medioambientales y de seguridad sobre los productos antes de tomar una decisión de compra (WOWTRACE, 2020). Una mayor transparencia de los orígenes de los productos ayudará a impulsar un consumo positivo y obligará a las empresas a cambiar la forma en que gestionan sus recursos. Blockchain tiene un gran potencial para generar esa transparencia, ya que ofrece un registro inmutable de transacciones que verifica el origen de los productos (Lancelott, et al., 2020). Al ofrecer a los consumidores una trazabilidad de los productos mediante Blockchain, las empresas circulares ayudarán a estos a tomar unas decisiones mejor informadas que les beneficie a ellos y al medioambiente (WOWTRACE, 2020). Por otro lado, una mayor transparencia ayudará a las empresas circulares a respaldar las afirmaciones de sostenibilidad con datos objetivos para obtener una ventaja competitiva sobre aquellas empresas con un modelo de negocio lineal.

Dos empresas que ya están trabajando en este ámbito son Provenance y Circularise, centrándose en ofrecer, tanto para los consumidores como para las empresas, una mayor transparencia sobre el ciclo de vida de los productos a lo largo de toda la cadena de suministro. La solución de Provenance permite a los consumidores verificar la veracidad de las afirmaciones sostenibles que hacen las empresas, para impulsar el cambio hacia la economía circular a través de sus decisiones de compra (Provenance, 2021). Circularise ofrece la misma solución y además permite digitalizar y rastrear materiales a través de cadenas de suministro complejas en una Blockchain pública sin poner en compromiso la confidencialidad. Las distintas partes interesadas dentro de la cadena de suministro pueden compartir información de manera abierta y segura, sin revelar ningún dato sensible subyacente gracias al elemento clave del protocolo de Circularise: la prueba de conocimiento cero (en inglés, *zero-knowledge proofs*, abreviado, ZKP) (Circularise, 2021). Esta tecnología criptográfica permite validar la veracidad de cierta información sin revelar los datos que lo demuestran. Esto es útil, por ejemplo, cuando un productor no quiere compartir una información concreta sobre la composición de un producto (e.g., un plástico que contiene aditivos retardantes de llama), por razones de confidencialidad, que es importante para aquellos que se encuentran al final de la cadena de suministro (e.g., recicladores), para poder procesar los materiales de forma correcta (Hattersley, 2020).

4. APLICACIONES EN EL SECTOR DEL RECICLAJE

Como hemos podido observar en la Figura 4 la economía circular está compuesta por varios ciclos, entre los cuales se encuentra el ciclo del reciclaje. Actualmente la percepción que tiene el público en general sobre el sistema circular es que se centra principalmente en el reciclaje. Sin embargo, el reciclaje es solo un componente de este sistema y como hemos explicado en el apartado 3.1. este ciclo al ser el más largo de todos tiene el valor más bajo, porque requiere una mayor energía para recuperar el valor de los materiales, por lo tanto, solo debe considerarse cuando no existan otras alternativas (i.e., reparación, reutilización, remanufactura) (Pheifer, 2017).

Para manipular y clasificar los desechos durante el proceso de reciclaje de forma eficiente es necesario disponer de una información adecuada acerca de la composición de los productos, los procesos a los que se han sometido, su calidad y la localización (Kouhizadeh, et al., 2019). Disponer de una información transparente durante la gestión de los residuos es tarea complicada en la actualidad debido a la fragmentación de las cadenas de suministro, y la proliferación y complejidad de algunos materiales. Junto con otras tecnologías de la Industria 4.0, la Blockchain, puede ofrecer una información precisa y fiable sobre el flujo de los materiales en la cadena de suministro (Ramachandra, 2020).

4.1. SITUACIÓN ACTUAL EN EL SECTOR DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS

Las tasas de generación de residuos son cada vez mayores en todo el mundo. En el año 2016 se generaron alrededor de 2 billones de toneladas de desechos sólidos, lo cual se traduce a una huella de 0,74 kilogramos por persona al día. Debido al rápido crecimiento de la población y la urbanización, se estima que la generación de desechos aumente en un 70% durante las próximas tres décadas si no se toman medidas urgentes. Por desgracia, los residentes de países en desarrollo son los que se ven más afectados por la mala gestión de los desechos. En estos países más del 90% de los residuos se desechan en vertederos no regulados o se incineran. Estas malas prácticas perjudican la salud de las personas y contribuyen al cambio climático global (The World Bank, 2019).

Al aumento de la cantidad de desechos se suma la complejidad y proliferación de nuevos materiales, lo que hace que el proceso de reciclaje se complique todavía más. Por ejemplo, en el caso de los plásticos, la utilización de nuevos aditivos como los estabilizadores térmicos, pigmentos, retardantes de llama, antimicrobianos o modificadores de impacto ha aumentado exponencialmente la complejidad de las cuatro clases principales de polímeros (i.e., PE, PET, PP y PVC), que se emplean en multitud de aplicaciones e industrias en la actualidad. Esta gran variedad de materiales hace que el proceso de reciclaje sea complicado a la hora de identificarlos y separarlos, para garantizar la pureza necesaria y así mantener la calidad (Ellen MacArthur Foundation, 2014). Siguiendo con el ejemplo anterior, los envases de plástico hechos de PET, PP y HDPE deben tener al menos un 95% de pureza para venderse de nuevo a precios de resina virgen (Waghray, et al., 2019).

4.2. EL VALOR DE BLOCKCHAIN EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS

Tener un seguimiento sobre los datos que se generan en el sector de la gestión de residuos es clave para cumplir las leyes y políticas existentes (e.g., Plan de Acción para la Economía Circular), y prevenir que los residuos acaben en vertederos o incinerados. La implementación de Blockchain en el sector del reciclaje es un caso concreto de gestión de la cadena de suministro, el cual está ganando cada vez más atención. En el contexto de la gestión de residuos, las aplicaciones de Blockchain actuales se centran, por un lado, en ofrecer soluciones que aumenten la visibilidad y transparencia sobre el

ciclo de vida de los productos desde su origen hasta su eliminación y, por otro lado, en incentivar un mejor reciclaje y clasificación de los residuos (Taylor, et al., 2020).

Una de las capacidades más prominentes de la Blockchain en este ámbito consiste en ofrecer transparencia y trazabilidad de los residuos almacenando todo el ciclo de vida de estos, desde su origen hasta su eliminación. Su naturaleza descentralizada permite registrar todas las actividades que tienen lugar en el sector de la gestión de residuos de forma verificable y permanente. Además, la replicación del libro mayor entre los participantes establece una total confianza y transparencia en el sistema (Sahoo & Halder, 2020). La información sobre la procedencia de los residuos puede obtenerse gracias a identificadores digitales, como por ejemplo códigos QR o etiquetas RFID, que dotan a cada producto de una identidad digital única. Disponer de una base de datos que contiene información sobre la procedencia de los residuos permite tener una auditabilidad para identificar a las organizaciones e individuos que no gestionan los residuos de forma sostenible con el fin de imponer sanciones o aconsejar a quienes tienen el potencial de mejorar (Taylor, et al., 2020). De este modo, cuando un producto acabe desechado en alguna playa, las autoridades competentes podrán acceder al registro digital en la Blockchain a través del código QR integrado en el producto, para identificar a la parte responsable e imponer la sanción correspondiente (Steenmans & Taylor, 2018). Estas ventajas de Blockchain facilitan la confianza entre los usuarios y ofrecen incentivos para que actúen de manera honesta (Taylor, et al., 2020). La información recogida por estos sensores ayudaría al sector de la gestión de residuos conocer a través de la Blockchain la cantidad recolectada, cuánto se puede reciclar, qué cantidad es peligrosa y no biodegradable, etc. (Bhalla, s.f.). Además, la posibilidad de poder identificar cada producto de manera individual permitiría separar los flujos de residuos en flujos más homogéneos para evitar la contaminación del lote y así recuperar la calidad más alta de los residuos (Waughray, et al., 2019; Hattersley, 2020). En el caso de los juguetes, por ejemplo, si están compuestos exclusivamente de polietileno, se pueden fundir y reutilizar, pero si existe algún juguete con componentes de poliéster es necesario separarlos adecuadamente para poder recuperar el valor de los materiales (Het Groene Brein, 2020).

Un problema que existe en el sector de la gestión de residuos tiene que ver con la falta de responsabilidad y visibilidad en la cadena de tratamiento y procesamiento de desechos (Futuroenviro, 2019). A través del sistema actual es imposible responsabilizar a las organizaciones o a las personas por los residuos que han creado y las malas prácticas en el reciclaje. Normalmente la carga de la responsabilidad de reducir los desechos que acaban en vertederos suele recaer sobre los productores de bienes. Blockchain tiene la capacidad de reunir a todos los actores que hay dentro de una cadena de suministro (empresas, consumidores e industria de la gestión de residuos) para crear una mayor visibilidad dentro de esta, mostrar los impactos que tiene cada participante de la red y así crear un nivel de responsabilidad en todos los miembros, y no solo en los productores (Staub, 2019).

La presencia digital en la Blockchain de contratos y otro tipo de documentos que regulen las actividades de gestión de residuos erradica la posibilidad de que se pierda la información como suele ocurrir con los documentos físicos, y acelera los procesos de validación al eliminar el papeleo manual (LeewayHertz, 2020). En el sistema actual de gestión de residuos existe un problema a la hora de determinar si las tarifas, que los contratistas cobran a los gobiernos locales por eliminar los desechos, son precisas. Estas tarifas se calculan generalmente en función de la cantidad de desechos en kilogramos que se ha eliminado (Nasdaq, 2018). Cuando los contratistas eliminan los

desechos tienen que presentar un informe para recibir el pago por el servicio. Actualmente no existe un mecanismo que pueda examinar estos informes y dado que estos se pueden manipular fácilmente se han incrementado los fraudes de pago. Dentro de la Blockchain este tipo de prácticas fraudulentas se erradicarían ya que los datos son inmutables y se sellan en el tiempo, de modo que a la hora de pagar a los contratistas las partes involucradas pueden rastrear el historial de la actividad de gestión de residuos para verificar la veracidad del informe (LeewayHertz, 2020).

El tráfico ilegal de residuos es otro fenómeno preocupante en la gestión de residuos en todo el mundo. Este tipo de delitos medioambientales, además de agotar las materias primas escasas y valiosas, tiene consecuencias extremadamente negativas tanto para el medioambiente como para la salud de las personas. Debido a que solo el 9% de los desechos plásticos de todo el mundo se reciclan mediante procedimientos legales y de forma controlada, se estima que entre 4 y 12 millones de megatoneladas de desechos plásticos acaban en los océanos todos los años (Dermatas & Georganti-Ntaliap, 2020). Por otro lado, el mercado de productos electrónicos produce cerca de 50 millones de toneladas de desechos electrónicos y eléctricos al año, de los cuales menos del 20% se recicla formalmente, y el 80% termina en vertederos, contaminando el suelo y las fuentes de agua, o se desecha de forma ilegal, la mayoría de las veces manualmente, en países en desarrollo exponiendo a los trabajadores a sustancias peligrosas (UNEP, 2019). Como ya hemos comentado anteriormente Blockchain funciona como un libro mayor digital donde las transacciones se pueden registrar públicamente y de forma cronológica. Esto permitiría tener un seguimiento del reciclaje y los envíos de residuos, así como asegurar el cumplimiento de la normativa para evitar este tipo de delitos medioambientales (Njuguna, 2020).

Arep, una subsidiaria de la compañía ferroviaria nacional francesa SNCF, desarrolló un sistema capaz de recopilar información detallada acerca de los residuos mediante Blockchain. Con el fin de optimizar la recolección y clasificación de residuos en la estación de tren, se conectó cada contenedor de basura a la Blockchain a través de sensores con Bluetooth para conocer en cada momento la cantidad, tipo y frecuencia de los desechos recolectados en los contenedores de la estación (Steenmans & Taylor, 2018; Taylor, et al., 2020).

Tetra Pak es otra organización que se ha unido a esta tendencia en colaboración con TradeLens (una plataforma Blockchain desarrollada conjuntamente por Maersk e IBM en el año 2018 con el fin de conectar a las diferentes partes de una cadena de suministro) (Copigneaux, et al., 2020). La empresa sueca especializada en el procesamiento, envasado y distribución de productos alimenticios ha lanzado una plataforma digital a través de la cual poder identificar cada envase de cartón con el objetivo de ofrecer una trazabilidad de extremo a extremo, para incrementar la transparencia en la cadena de suministro. La utilización de códigos de identificación y códigos QR dota de una identidad digital a cada envase de cartón, que cuando se escanean ofrecen una información muy valiosa acerca del producto, por ejemplo, su origen ético, contenido y dónde se puede reciclar el envase (Poole, 2019).

Aparte de ofrecer transparencia a la cadena de suministro de reciclaje, Blockchain incentiva a las empresas y a los consumidores a reciclar de forma adecuada. Esta tecnología permite tokenizar los recursos naturales, atribuyéndoles una identidad digital, similar a una moneda digital, que la gente puede intercambiar (Lancelott, et al., 2020). En el sector del reciclaje ya existen iniciativas que están probando esto. Por ejemplo, Plastic Bank ha desarrollado un ecosistema de reciclaje, gracias a la plataforma Blockchain de IBM, donde recompensa a las personas por recolectar materiales de

vertederos y océanos en países con sistemas de gestión de residuos ineficaces (e.g., Haití, Filipinas, Indonesia y Brasil). Esta solución brinda transparencia y confianza a la industria del reciclaje informal y, además, permite a las personas de países en vías de desarrollo intercambiar desechos plásticos por recompensas en forma de efectivo o *tokens*, respaldados por activos de Plastic Bank y la Blockchain de IBM, lo que les ayuda a satisfacer las necesidades básicas de sus familias (e.g., alimentación, escolarización, seguro médico, etc.) (Katz, 2020).

5. CONCLUSIONES

Tras haber realizado el estudio sobre la Blockchain, la economía circular y las aplicaciones que ofrece la primera en el sector de la gestión de residuos se llega a las siguientes conclusiones.

La Blockchain a pesar de ser una tecnología que se encuentra en una fase de desarrollo ya ha demostrado su gran potencial en multitud de sectores como el financiero, la logística, la atención médica o los servicios públicos. Pero todavía existen algunos desafíos como la falta de escalabilidad e interoperabilidad, el uso excesivo de energía, que perjudica al medioambiente, o el problema de la centralización que es necesario afrontar para que las aplicaciones basadas en la Blockchain tengan éxito y prosperen en el futuro.

En el contexto de la economía circular, la Blockchain puede ser la tecnología ideal para hacer la transición hacia este nuevo paradigma. Una condición indispensable para lograr que el sistema circular se convierta en el nuevo *statu quo* consiste en disponer de la infraestructura correcta para compartir la información sobre los recursos que hay dentro de la economía de una manera transparente, para así poder cerrar los ciclos de los productos de una forma más eficiente. Esta infraestructura se podría obtener gracias a la tecnología Blockchain. Su naturaleza descentralizada hace que la información sea transparente, trazable y segura para todas las partes que componen la economía, sin que una autoridad central controle o manipule los registros.

En el caso de la gestión de residuos y las empresas de reciclaje pienso que Blockchain es una herramienta con bastante potencial porque, además de facilitar las actividades de recolección, tratamiento y procesamiento necesarias para recuperar de nuevo el valor de los recursos dentro de la economía circular, ofrece incentivos a los consumidores para que participen en la gestión de residuos a través de tokens como hemos podido ver en el caso de Plastic Bank.

El tema de estudio que hemos tratado en este trabajo me ha permitido explorar dos conceptos relativamente recientes, como son la Blockchain y la economía circular, los cuales siguen siendo, por el momento, desconocidos por la gran mayoría de la ciudadanía, pero que están ganando cada vez más presencia en artículos de investigación en el ámbito académico. Una posible línea de continuidad del presente trabajo podría consistir en el diseño de una propuesta práctica basada en Blockchain conjuntamente con otras tecnologías de seguimiento, como códigos QR, etiquetas RFID o dispositivos de Internet de las cosas, que monitoree los residuos a lo largo de la cadena de suministro de reciclaje.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Bhalla, A., s.f. *BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN GARBAGE COLLECTION*. [En línea]
Available at: <https://www.blockchain-council.org/blockchain/blockchain-technology-in-garbage-collection/>
[Último acceso: 18 junio 2021].
- Binance Academy, 2020a. *¿Cómo funciona Blockchain?*. [En línea]
Available at: <https://academy.binance.com/es/articles/how-does-blockchain-work>
[Último acceso: 30 marzo 2021].
- Binance Academy, 2020b. *¿Qué es Prueba de trabajo?*. [En línea]
Available at: <https://academy.binance.com/es/articles/proof-of-work-explained>
[Último acceso: 1 abril 2021].
- Circularise, 2021. *Resources Library*. [En línea]
Available at: <https://www.circularise.com/resources>
[Último acceso: 19 junio 2021].
- Comisión Europea, 2019. *Industrial Symbiosis*. [En línea]
Available at: https://ec.europa.eu/environment/europeangreencapital/wp-content/uploads/2018/05/Industrial_Symbiosis.pdf
[Último acceso: 18 junio 2021].
- Comisión Europea, 2019. *Un Pacto Verde Europeo*. [En línea]
Available at: https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es
[Último acceso: 15 marzo 2021].
- Comisión Europea, 2020. *Modificar nuestras pautas de producción y consumo: El nuevo Plan de acción para la economía circular muestra el camino hacia una economía competitiva y climáticamente neutra de consumidores empoderados*. [En línea]
Available at: https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/es/ip_20_420
[Último acceso: 16 marzo 2021].
- Comisión Europea, 2021a. *Causas del cambio climático*. [En línea]
Available at: https://ec.europa.eu/clima/change/causes_es
[Último acceso: 23 abril 2021].
- Comisión Europea, 2021b. *Acuerdo de París*. [En línea]
Available at: https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es#tab-0-0
[Último acceso: 15 marzo 2021].
- Comisión Europea, 2021c. *Cadena de bloques para la acción climática*. [En línea]
Available at: <https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/blockchain-climate-action-Q?ettrans=es>
[Último acceso: 16 marzo 2021].
- Conway, L., 2020. *Blockchain Explained*. [En línea]
Available at: <https://www.investopedia.com/terms/b/blockchain.asp>
[Último acceso: 22 marzo 2021].
- Copigneaux, B. y otros, 2020. *Blockchain for supply chains and international trade*, s.l.: s.n.

Dagnet, Y., Cogswell, N. & Mendoza, J. M., 2020. *4 Ways to Strengthen Climate Action in the Wake of COVID-19*. [En línea]

Available at: <https://www.wri.org/insights/4-ways-strengthen-climate-action-wake-covid-19>
[Último acceso: 19 abril 2021].

Dantas, T., 2018. *Organizations Fighting Climate Change: A quick guide*. [En línea]

Available at: [https://thalesetd.medium.com/organizations-fighting-climate-change-a-quick-guide-2e700d96dc52#:~:text=UN%20Agencies,World%20Meteorological%20Organization%20\(WMO\)~](https://thalesetd.medium.com/organizations-fighting-climate-change-a-quick-guide-2e700d96dc52#:~:text=UN%20Agencies,World%20Meteorological%20Organization%20(WMO)~)
[Último acceso: 15 marzo 2021].

Dermatas, D. & Georganti-Ntaliap, A., 2020. *Plastic waste trafficking: An ever-growing environmental crime that needs to be tackled*. [En línea]

Available at: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/0734242X20966250>
[Último acceso: 10 julio 2021].

edie newsroom, 2015. *\$19bn e-waste black market 'threatening the planet*. [En línea]

Available at: [https://www.edie.net/news/5/-19bn-e-waste-black-market--threatening-the-planet-/](https://www.edie.net/news/5/-19bn-e-waste-black-market--threatening-the-planet/)
[Último acceso: 10 julio 2021].

Ellen MacArthur Foundation, 2014. *Towards the Circular Economy Vol. 3: Accelerating the scale-up across global supply chains*, s.l.: s.n.

Ellen MacArthur Foundation, 2018. *Schools of Thought*. [En línea]

Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/schools-of-thought#:~:text=The%20circular%20economy%20concept%20has,%2C%20thought-leaders%20and%20businesses.>
[Último acceso: 6 mayo 2021].

Ellen MacArthur Foundation, 2019. *Circular Economy System Diagram*. [En línea]

Available at: <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/concept/infographic>
[Último acceso: 14 julio 2021].

Flynn, S., 2020. *3 Ways the Recycling Supply Chain Is Using Blockchain*. [En línea]

Available at: <https://epsnews.com/2020/09/14/3-ways-the-recycling-supply-chain-is-using-blockchain/>
[Último acceso: 18 junio 2021].

Frankenfield, J., 2020. *¿What Is Proof of Elapsed Time (PoET)?*. [En línea]

Available at: [https://www.investopedia.com/terms/p/proof-elapsed-time-cryptocurrency.asp#:~:text=Proof%20of%20elapsed%20time%20\(PoET\)%20is%20a%20consensus%20algorithm%20developed,block%20winners%20and%20mining%20rights.&text=The%20PoET%20algorithm%20generates%20a,to%20](https://www.investopedia.com/terms/p/proof-elapsed-time-cryptocurrency.asp#:~:text=Proof%20of%20elapsed%20time%20(PoET)%20is%20a%20consensus%20algorithm%20developed,block%20winners%20and%20mining%20rights.&text=The%20PoET%20algorithm%20generates%20a,to%20)
[Último acceso: 16 abril 2021].

Futureenviro, 2019. BLOCKCHAIN APPLIED TO THE WASTE MANAGEMENT SECTOR. julio, Issue 62.

Grigorchuk, K., 2019. *Overview of 9 blockchain consensus algorithms*. [En línea]

Available at: <https://digiforest.io/en/blog/blockchain-consensus-algorithms>

[Último acceso: 24 abril 2021].

Hattersley, V., 2020. *The start-up interview: Is blockchain a key to the circular economy?*. [En línea]

Available at: <https://packagingeurope.com/start-up-interview-blockchain-circular-economy/>

[Último acceso: 18 junio 2021].

Herweijer, C., Combes, B., Swanborough, J. & Davies, M., 2018. *Building Block(chain)s for a Better Planet*. [En línea]

Available at: <https://www.weforum.org/reports/building-block-chain-for-a-better-planet>

[Último acceso: 14 julio 2021].

Het Groene Brein, 2020. *What is the circular economy?*. [En línea]

Available at: <https://kenniskaarten.hetgroenebrein.nl/en/kenniskaart/circular-economy/>

[Último acceso: 19 mayo 2021].

Hewett, N., Lehmacher, W. & Wang, Y., 2019. *Inclusive Deployment of Blockchain for Supply Chains: Part 1 – Introduction*, s.l.: s.n.

Ishii, N., 2021. *The next decade is critical for the climate. Here's how the circular economy can help*. [En línea]

Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2021/03/how-the-circular-economy-can-help-the-climate/>

[Último acceso: 10 mayo 2021].

Katz, D., 2020. *Plastic Bank: Recycling ecosystems*. [En línea]

Available at: <https://www.ibm.com/blogs/corporate-social-responsibility/2020/04/plastic-bank-recycling-ecosystems/>

[Último acceso: 19 junio 2021].

Kirchherr, J. y otros, 2018. Barriers to the Circular Economy: Evidence From the European Union (EU). *Ecological Economics*, Volumen 150, pp. 264-272.

Kouhizadeh, M. & Sarkis, J., 2018. Blockchain Practices, Potentials, and Perspectives in Greening Supply Chains. *Sustainability*, 10(10).

Kouhizadeh, M., Sarkis, J. & Zhu, Q., 2019. At the Nexus of Blockchain Technology, the Circular Economy, and Product Deletion. *Applied Sciences*, 9(8).

Lancelott, M., Chrysochou, N. & Archard, P., 2020. *Blockchain can drive the Circular Economy*. [En línea]

Available at: <https://www.paconsulting.com/insights/blockchain-can-drive-the-circular-economy/>

[Último acceso: 12 julio 2021].

LeewayHertz, 2020. *HOW BLOCKCHAIN COULD TRANSFORM THE WASTE MANAGEMENT INDUSTRY?*. [En línea]

Available at: <https://www.leewayhertz.com/blockchain-waste-management/>

[Último acceso: 18 junio 2021].

- Lewis, J., 2019. *Consensus Algorithms Used by Top Blockchain Networks*. [En línea]
Available at: <https://medium.com/the-capital/consensus-algorithms-used-by-top-blockchain-networks-b576392cf5ad>
[Último acceso: 15 abril 2021].
- Lyons, T., Courcelas, L. & Timsit, K., 2019. *Scalability, interoperability and sustainability of Blockchains*, s.l.: s.n.
- McGinty, D., 2021. *5 reasons to shift from a 'throw-it-away' consumption model to a 'circular economy'*. [En línea]
Available at: <https://www.weforum.org/agenda/2021/02/change-five-key-areas-circular-economy-sustainability>
[Último acceso: 11 mayo 2021].
- Nakamoto, S., 2008. *Bitcoin: un sistema de dinero en efectivo electrónico peer-to-peer*. [En línea]
Available at: https://bitcoin.org/files/bitcoin-paper/bitcoin_es.pdf
[Último acceso: 18 marzo 2021].
- Nascimento, S., Pólvara, A. & Lourenço, J. S., 2018. *Blockchain4EU: Blockchain for Industrial Transformations*. [En línea]
Available at: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a230c2aa-6220-11e8-ab9c-01aa75ed71a1/language-en>
[Último acceso: 29 marzo 2021].
- Nasdaq, 2018. *Reducing Waste: Introducing Garbage Collection to Blockchain Technology*. [En línea]
Available at: <https://www.nasdaq.com/articles/reducing-waste-introducing-garbage-collection-blockchain-technology-2018-05-08>
[Último acceso: 18 junio 2021].
- Njuguna, B., 2020. *How Blockchain is Prompting Innovations in Waste Management*. [En línea]
Available at: <https://blockchain.news/analysis/how-blockchain-is-prompting-innovations-in-waste-management>
[Último acceso: 12 julio 2021].
- Oberhaus, D., 2018. *The World's Oldest Blockchain Has Been Hiding in the New York Times Since 1995*. [En línea]
Available at: <https://www.vice.com/en/article/j5nzx4/what-was-the-first-blockchain>
[Último acceso: 22 marzo 2021].
- Parlamento Europeo, 2021. *Circular economy: definition, importance and benefits*. [En línea]
Available at: <https://www.europarl.europa.eu/news/en/headlines/economy/20151201STO05603/circular-economy-definition-importance-and-benefits>
[Último acceso: 2 junio 2021].
- Pheifer, A., 2017. *BARRIERS & ENABLERS to Circular Business Models*, s.l.: s.n.
- Poole, J., 2019. *"Packaging's future is undoubtedly digital," says Tetra Pak VP at connective platform launch*. [En línea]
Available at: <https://www.packaginginsights.com/news/packagings-future-is-undoubtedly->

digital-says-tetra-pak-vp-at-connective-platform-launch.html

[Último acceso: 19 junio 2021].

Provenance, 2021. *Our Mission*. [En línea]

Available at: <https://www.provenance.org/about>

[Último acceso: 19 junio 2021].

R2Pi Project, 2018. *Enablers and Barriers to a Circular Economy*, Unión Europea: s.n.

Ramachandra, D., 2020. *Building Sustainable Circular Economy With Blockchain*. [En línea]

Available at: <https://www.datadriveninvestor.com/2020/11/17/building-sustainable-circular-economy-with-blockchain/#>

[Último acceso: 18 junio 2021].

Rijmenam, M. v., 2019. *7 Blockchain Challenges to be Solved before Large-Scale Deployment*.

[En línea]

Available at: <https://medium.com/dataseries/7-blockchain-challenges-to-be-solved-before-large-scale-deployment-3e45b47eee6>

[Último acceso: 27 junio 2021].

Rodríguez Canfranc, M., 2020. *De la Gran Recesión a la Gran Pandemia: diferencias entre la crisis de 2008 y la de 2020*. [En línea]

Available at: <https://www.bbva.com/es/de-la-gran-recesion-a-la-gran-pandemia-diferencias-entre-la-crisis-de-2008-y-la-de-2020/>

[Último acceso: 18 marzo 2021].

Rodríguez, L., 2020. *Various types of Distributed Ledger Technology*. [En línea]

Available at: <https://www.datadriveninvestor.com/2020/12/04/various-types-of-distributed-ledger-technology/>

[Último acceso: 24 marzo 2021].

Sahoo, S. & Halder, R., 2020. Blockchain-Based Forward and Reverse Supply Chains for E-waste Management. *Future Data and Security Engineering*.

Shandra, T. K., 2020. *Public vs. Private Blockchain: A comprehensive comparison*. [En línea]

Available at: <https://www.blockchain-council.org/blockchain/public-vs-private-blockchain-a-comprehensive-comparison/>

[Último acceso: 3 mayo 2021].

Stanislaus, M., 2018. *Barriers to a Circular Economy: 5 Reasons the World Wastes So Much Stuff (and Why It's Not Just the Consumer's Fault)*. [En línea]

Available at: <https://www.wri.org/insights/barriers-circular-economy-5-reasons-world-wastes-so-much-stuff-and-why-its-not-just>

[Último acceso: 7 junio 2021].

Staub, O., 2019. *Revolutionizing the waste supply chain: Blockchain for social good*. [En línea]

Available at: <https://www.ibm.com/blogs/blockchain/2019/08/revolutionizing-the-waste-supply-chain-blockchain-for-social-good/>

[Último acceso: 18 junio 2021].

Steenmans, K. & Taylor, P., 2018. *A rubbish idea: how blockchains could tackle the world's waste problem*. [En línea]

Available at: <https://theconversation.com/a-rubbish-idea-how-blockchains-could-tackle-the->

worlds-waste-problem-94457

[Último acceso: 18 junio 2021].

Taylor, P., Steenmans, K. & Steenmans, I., 2020. Blockchain Technology for Sustainable Waste Management. *Frontiers in Political Science*, Volumen 2, p. 15.

The World Bank, 2019. *Solid Waste Management*. [En línea]

Available at: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/brief/solid-waste-management>

[Último acceso: 7 julio 2021].

Tholen, J. y otros, 2019. *Is there a role for blockchain in responsible supply chains?*, s.l.: s.n.

UNEP, 2019. *UN report: Time to seize opportunity, tackle challenge of e-waste*. [En línea]

Available at: <https://www.unep.org/news-and-stories/press-release/un-report-time-seize-opportunity-tackle-challenge-e-waste>

[Último acceso: 11 julio 2021].

Union of Concerned Scientists, 2018. *¿Cómo sabemos que la actividad humana es la principal causa del cambio climático?*. [En línea]

Available at: <https://es.ucsusa.org/resources/actividad-humana-y-cambio-climatico#:~:text=Y%20la%20gran%20mayoría%20de,tala%20y%20quema%20de%20bosques>.

[Último acceso: 23 abril 2021].

Waghray, D. y otros, 2019. *Harnessing the Fourth Industrial Revolution for the Circular Economy: Consumer Electronics and Plastics Packaging*, s.l.: s.n.

WOWTRACE, 2020. *Blockchain traceability enhances competitive advantages for businesses*.

[En línea]

Available at: <https://medium.com/@wowtrace/blockchain-traceability-enhances-competitive-advantages-for-businesses-37b997dedf12>

[Último acceso: 13 julio 2021].

Yaga, D., Mell, P., Roby, N. & Scarfone, K., 2018. *Blockchain Technology Overview*. [En línea]

Available at: <https://www.nist.gov/publications/blockchain-technology-overview>

[Último acceso: 30 marzo 2021].